

空推隧道盾构机反作用力计算方法研究

王 明¹, 程勇东¹, 刘 学¹, 甘晓露^{2,3*}, 俞建霖^{2,3}, 龚晓南^{2,3}

(1. 中铁四局集团有限公司城市轨道交通工程分公司, 安徽 合肥 230041;

2. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 3. 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 盾构机掘进过程中, 若遇到大量坚硬岩层或上软下硬的特殊地质, 利用盾构机空推过矿山法隧道施工技术可减少盾构刀具磨损, 加快掘进速度, 降低盾构掘进的安全风险。使用该技术施工过程中, 一般在刀盘前方堆积足够数量的砂土来提供足够的反作用力, 但反作用力的取值需要结合盾构机及管片的受力状况进行一定的计算。本文在既有研究基础之上, 对空推隧道盾构机反作用力计算问题进行分析研究, 以评估水平、上坡、下坡 3 种工况下盾构机空推所需要的反作用力。研究结果表明, 隧道在上坡状态下应考虑盾构机自重和堆填砂土重量分力产生的额外反作用力作用, 而在下坡状态则应考虑盾构机自重和堆填砂土重量分力引发的反力减小。

关键词: 盾构隧道; 空推隧道; 矿山法隧道施工; 盾构机反作用力

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)03-0206-05

Study on reaction force calculation method for a shield passing through an empty mined tunnel

WANG Ming¹, CHENG Yong-dong¹, LIU Xue¹, GAN Xiao-lu^{2,3*}, YU Jian-lin^{2,3}, GONG Xiao-nan^{2,3}

(1. Urban Rail Transit Engineering Branch of China Railway Fourth Bureau Group Co., Ltd., Hefei 230041, China;

2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

3. Engineering Research Center of Urban Underground Development, Hangzhou 310058, China)

Abstract: During the excavation of shield tunnel, a large number of hard rock strata or special geological with upper-soft and lower-hard are sometimes encountered. In this situation the shield technology of a shield passing through an empty mined tunnel can be applied. This technology can help to reduce the tool wear of shield tunneling, accelerate the tunneling speed and minimise the safety risk of shield tunneling. During the construction process, large amount of sand is needed to accumulate in front of the cutter head to provide sufficient reaction force. And the value of reaction force can be calculated based on the loading conditions of shield machine and segment. Grounded on the existing research, this paper analyzes and studies the reaction force calculation of a shield tunnel passing through an empty mined tunnel in the horizontal, uphill and downhill working conditions. The results show that the additional reaction force caused by the deadweight component of the shield machine and the weight component of the landfill sand should be taken into account in the uphill condition. In the downhill condition, the reaction reduction will be caused by the deadweight component of the shield machine and the weight component of the landfill sand, and should be taken into account.

Key words: shield tunnel; shield passing through empty tunnel; mining method of tunnel construction; reaction force of shield machine

0 引 言

为满足我国城市化发展的需求, 我国地铁网络建设呈现快速发展的趋势, 目前在建或拟建地铁的

城市有 40 余座。盾构法作为目前最为先进的隧道施工方法, 以其施工环境影响小、施工快速安全及机械化程度高等诸多优势, 已经成为我国城市地区地铁隧道建设的首选方法^[1-2]。

收稿日期: 2021-04-25

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2019C03103)。

作者简介: 王明 (1985—), 男, 甘肃金塔人, 本科, 高级工程师, 主要从事城市轨道交通工程的研究工作。E-mail: 149765587@qq.com。

*通讯作者: 甘晓露 (1994—), 男, 山东东营人, 博士研究生, 主要从事盾构隧道环境影响方面的研究工作。E-mail: xlgan@zju.edu.cn。

盾构机在掘进过程中,前方的刀盘会不断切削周围的土体。如果地层中存在大量坚硬岩层、孤石群或地层呈现上软下硬状态时,仍采用盾构法施工将会加速刀具磨损、降低掘进速度。如果在盾构掘进过程中进行刀盘更换或维修将导致施工成本大幅增加,而且施工过程中的刀盘更换施工安全风险极大,会对工程整体进度和施工人员安全产生较大影响。为了使盾构机在这种复杂地层中还能连续安全地掘进及管片拼装,盾构机空推过矿山法隧道施工技术应运而生。李剑明^[3]结合深圳地铁2号线工程案例介绍了盾构空推拼装管片推进通过矿山法隧道的特殊施工技术。李锦富等^[4]介绍了深圳地铁某区间盾构空推过矿山法隧道段的施工过程,并分析和提出了空推隧道管片渗漏水控制方法。

矿山法隧道施工完成后,盾构隧道会在空推的状况下进行管片拼装,此时盾构掌子面无土压力的反作用力作用,会使盾构管片环缝间隙增大,影响隧道的拼接质量及防水性能。为保证盾构机通过空推段时的管片拼装质量,盾构机前方必须提供足够的反作用力,以将管片环缝间隙挤压密实,确保隧道密封性能良好,管片环之间不漏水。实际施工过程中,采用刀盘前方堆积足够数量的砂土来提供足够的反力,但反作用力的取值需要结合盾构机及管片的受力状况进行一定的计算。王春河^[5]对水平状态下的空推隧道盾构机反作用力计算方法进行了分析,未研究盾构隧道处于上坡或下坡时相应的反作用力计算方法。本文在既有研究基础之上,对空推隧道盾构机反作用力计算问题进行分析研究,以评估不同工况下盾构机空推所需要的反作用力。

1 空推隧道盾构机反作用力计算方法

1.1 计算方法概述

为保证盾构机通过空推段时的管片拼装质量,盾构机前方必须提供足够的反作用力,以将管片环缝间隙挤压密实,确保隧道密封性能良好,管片环之间不漏水。实际施工过程中,可以通过在刀盘前方堆积足够数量的砂土提供足够的反作用力。因此,如图1所示,当考虑隧道处于水平状态时,空推隧道的反作用力由以下5个部分组成^[5]:

(1) 混凝土导台与盾构机的摩擦阻力 F_1 。盾构机在空推阶段主要依靠混凝土导台支撑,导台与盾构机之间的摩擦阻力可以提供一定的反作用力作用。

(2) 盾构刀盘前方堆填土体土压力所提供的

轴向阻力 F_2 。

(3) 盾构刀盘前方堆填土体底部提供的摩擦阻力 F_3 。盾构机在空推阶段会在千斤顶的推力作用下逐渐向前移动,刀盘前方堆填土体与矿山隧道底板之间会产生相应的滑动摩擦阻力。

(4) 盾尾刷与管片之间的摩擦阻力 F_4 。盾构机在向前移动时,盾尾刷与管片之间也会产生一定的摩擦阻力。

(5) 后配套台车的牵引阻力 F_5 。

因此,根据以上计算,盾构机空推时所能提供给盾构管片的总反作用力 F 为:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \quad (1)$$

由式(1)可知,总反作用力的大小可通过调整 F_2 和 F_3 ,即堆填砂土的数量进行调整,以满足管片防水性能等需求。

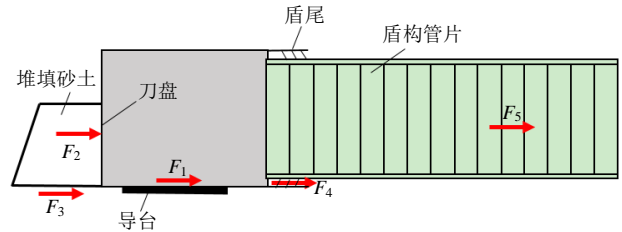


图1 空推隧道盾构机受力示意图

Fig. 1 Force diagram of a shield passing through an empty mined tunnel

1.2 计算方法建立

既有的空推隧道反作用力分析仅针对处于水平状态的隧道,实际上,盾构隧道在空推过程中很可能处于上坡或下坡状态,会使得空推反作用力计算出现不同的结果。因此本文分别对3种状态下的盾构空推反作用力计算进行讨论。

(1) 水平状态

a) 混凝土导台与盾构机的摩擦阻力 F_1 。

$$F_1 = \mu_1 W_s \quad (2)$$

式中: μ_1 为混凝土导台与盾构机之间的摩擦系数,一般可取为0.3; W_s 为盾构机的总重量。

b) 盾构刀盘前方堆填土体侧向土压力所提供的轴向阻力 F_2 。

$$F_2 = HD\gamma_s K_s \frac{H}{2} \quad (3)$$

式中: D 为盾构掌子面直径; L 为堆填砂土长度; γ_s 为堆填砂土的重度; K_s 为堆填砂土的侧压力系数; H 为堆填砂土的高度。由式(2)可知,本文假定土体与盾构刀盘的接触面积为 HD 。

c) 盾构刀盘前方堆填土体底部提供的摩擦阻力 F_3 。

$$F_3 = HDL\gamma_s\mu_2 \quad (4)$$

式中: L 为堆填砂土长度; μ_2 为堆填土体与矿山法隧道底板之间的摩擦系数。

d) 盾尾刷与管片之间的摩擦阻力 F_4 。

$$F_4 = n\mu_3W_g \quad (5)$$

式中: n 为盾尾刷上的管片环数, 一般取 2; μ_3 为盾尾刷与管片之间的摩擦系数; W_g 为隧道管片的重量。

e) 后配套台车的牵引阻力 F_5 。

$$F_5 = \mu_4W_t \quad (6)$$

式中: μ_4 为配套台车与隧道结构接触面的摩擦系数; W_t 为配套台车的重量。

最终的空推反作用力为:

$$F = \mu_1W_s + HD\gamma_s \left(K_s \frac{H}{2} + L\mu_2 \right) + n\mu_3W_g + \mu_4W_t \quad (7)$$

(2) 上坡状态

上坡状态下的空推隧道盾构机受力示意图如图 2 所示。

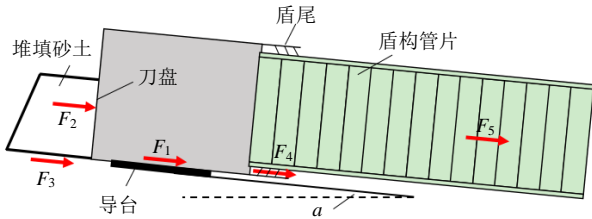


图 2 空推隧道上坡状态下盾构机受力示意图

Fig. 2 Force diagram of a shield passing through an empty mined tunnel in the uphill condition

a) 混凝土导台与盾构机的摩擦阻力 F_1 。

$$F_1 = \mu_1W_s \cos \alpha \quad (8)$$

式中: α 为上坡角度。

b) 盾构刀盘前方堆填土体土压力所提供的轴向阻力 F_2 。

$$F_2 = HD\gamma_s K_s \frac{H}{2} \cos \alpha \quad (9)$$

c) 盾构刀盘前方堆填土体底部提供的摩擦阻力 F_3 。

$$F_3 = HDL\gamma_s\mu_2 \cos \alpha \quad (10)$$

d) 盾尾刷与管片之间的摩擦阻力 F_4 。

$$F_4 = n\mu_3W_g \cos \alpha \quad (11)$$

e) 后配套台车的牵引阻力 F_5 。

$$F_5 = \mu_4W_t \cos \alpha \quad (12)$$

由于隧道处于上坡状态, 盾构机和堆填砂土重量分力会产生额外的反作用力作用。

f) 盾构机重量产生的阻力 F_6 。

$$F_6 = W_s \sin \alpha \quad (13)$$

g) 堆填砂土重量产生的阻力 F_7 。

$$F_7 = HDL\gamma_s \sin \alpha \quad (14)$$

最终的空推反力为:

$$F = \cos \alpha \left(\mu_1W_s + HD\gamma_s \left(K_s \frac{H}{2} + L\mu_2 \right) + n\mu_3W_g + \mu_4W_t \right) + \sin \alpha (W_s + HDL\gamma_s) \quad (15)$$

(3) 下坡状态

下坡状态下的空推隧道盾构机受力示意图如图 3 所示。

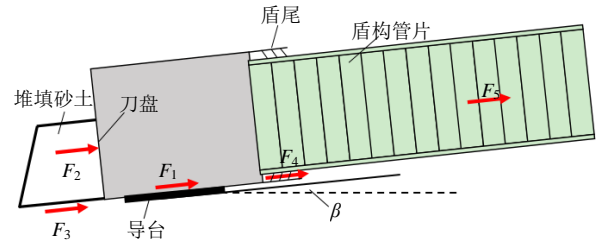


图 3 空推隧道下坡状态下盾构机受力示意图

Fig. 3 Force diagram of a shield passing through an empty mined tunnel in the downhill condition

a) 混凝土导台与盾构机的摩擦阻力 F_1 。

$$F_1 = \mu_1W_s \cos \beta \quad (16)$$

式中: β 为下坡角度。

b) 盾构刀盘前方堆填土体土压力所提供的轴向阻力 F_2 。

$$F_2 = HD\gamma_s K_s \frac{H}{2} \cos \beta \quad (17)$$

c) 盾构刀盘前方堆填土体底部提供的摩擦阻力 F_3 。

$$F_3 = \frac{\pi D^2}{4} L\gamma_s\mu_2 \cos \beta \quad (18)$$

d) 盾尾刷与管片之间的摩擦阻力 F_4 。

$$F_4 = n\mu_3W_g \cos \beta \quad (19)$$

e) 后配套台车的牵引阻力 F_5 。

$$F_5 = \mu_4W_t \cos \beta \quad (20)$$

由于隧道处于下坡状态, 盾构机和堆填砂土的重量会削弱反作用力。

f) 盾构机重量产生的分力 F_6 。

$$F_6 = -W_s \sin \beta \quad (21)$$

g) 堆填砂土重量产生的分力 F_7 。

$$F_7 = -\frac{\pi D^2}{4} L \gamma_s \sin \beta \quad (22)$$

最终的空推反作用力为:

$$F = \cos \beta \left(\mu_1 W_s + HDL \gamma_s \left(K_s \frac{H}{2} + L \mu_2 \right) + n \mu_3 W_g + \mu_4 W_t \right) - \sin \beta (W_s + HDL \gamma_s) \quad (23)$$

1.3 工程应用及分析

(1) 工程概况

杭临城际铁路某区间采用盾构工法施工, 接收段采用空推形式, 以减少盾构在硬岩段中的掘进风险。盾构段为单线单圆隧道。区间设置联络通道一座, 联络通道采用矿山法施工。

区间出高青区间 U 型槽以 1 400 m 曲线半径沿科技大道前行, 以 550 m 曲线半径向东南方向前行, 接入高新园区站。隧道从高青区间 U 型槽以 27.844% 下坡至最低点, 然后以 7.284% 坡度上坡, 最后以 2% 上坡至高新园区站接收。盾构区间埋深始发段覆土最浅 6.34 m, 最深处埋深 12.71 m。左右线间距 10.9~15.6 m。隧道采用 6 块管片错缝拼装而成, 管片为标准通用衬砌环, 环宽 1.5 m, 外径 6.7 m, 隧道内径 6.0 m, 管片壁厚 0.35 m, 每环楔形量 40 mm, 共计 1 123 环。本工程案例中空推阶段的隧道剖面示意图如图 4 所示。

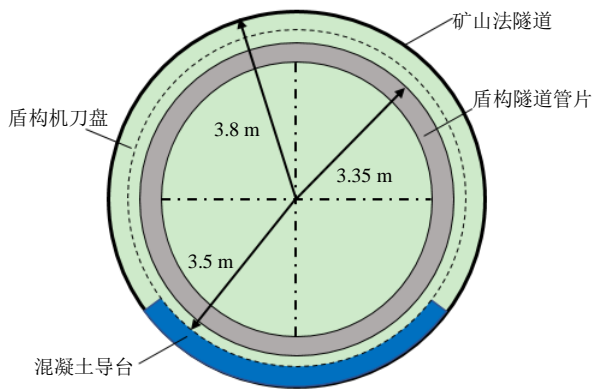


图 4 空推阶段隧道剖面示意图

Fig. 4 Diagram of the tunnel section for a shield passing through an empty mined tunnel

(2) 分析计算

由工程概况可知, 盾构隧道空推阶段处于上坡状态, 坡度为 7.284%, 坡角为 0.42°。

a) 混凝土导台与盾构机的摩擦阻力 F_1 。

$$F_1 = \mu_1 W_s \cos \alpha = 0.3 \times 438 \times 9.8 \times \cos 0.42^\circ = 1\ 287.69 \text{ kN} \quad (24)$$

b) 盾构刀盘前方堆填土体土压力所提供的轴向阻力 F_2 , 假定堆填土体高度为 2 m。

$$F_2 = HDL \gamma_s K_s \frac{H}{2} \cos \alpha = 13.8 \times 18.6 \times 0.39 \times 1 \times \cos 0.42^\circ = 100.1 \text{ kN} \quad (25)$$

c) 盾构刀盘前方堆填土体底部提供的摩擦阻力 F_3 , 假定堆填土体长度为 10 m。

$$F_3 = HDL \gamma_s \mu_2 \cos \alpha = 13.8 \times 10 \times 18.6 \times 0.3 \times \cos 0.42^\circ = 770.03 \text{ kN} \quad (26)$$

d) 盾尾刷与管片之间的摩擦阻力 F_4 。

$$F_4 = n \mu_5 W_g \cos \alpha = 2 \times 0.5 \times 200 \times \cos 0.42^\circ = 199.99 \text{ kN} \quad (27)$$

e) 后配套台车的牵引阻力 F_5 。

$$F_5 = \mu_4 W_t \cos \alpha = 0.5 \times 1\ 700 \times \cos 0.42^\circ = 850 \text{ kN} \quad (28)$$

由于隧道处于上坡状态, 盾构机和堆填砂土重量分力会产生额外的反作用力。

f) 盾构机重量产生的阻力 F_6 。

$$F_6 = W_s \sin \alpha = 438 \times 9.8 \times \sin 0.42^\circ = 31.46 \text{ kN} \quad (29)$$

g) 堆填砂土重量产生的阻力 F_7 。

$$F_7 = HDL \gamma_s \sin \alpha = 13.8 \times 10 \times 18.6 \times \sin 0.42^\circ = 18.81 \text{ kN} \quad (30)$$

最终的空推反作用力为:

$$F = \cos \alpha (\mu_1 W_s + HDL \gamma_s (K_s + \mu_2) + n \mu_3 W_g + \mu_4 W_t) + \sin \alpha (W_s + HDL \gamma_s) = 3\ 258.09 \text{ kN} \quad (31)$$

由计算结果可知, 当假定堆填土体长度为 10 m, 高度为 2 m 时, 空推反作用力约为 3 258.09 kN, 大于盾构防水性能所需的 3 000 kN^[5]。说明在这种情况下, 盾构机可以提供足够的反作用力。盾构机重量产生的阻力 F_6 以及堆填砂土重量产生的阻力 F_7 也提供一定的反作用力, 说明忽略上坡坡度的影响可能会使得反作用力计算结果偏于保守, 造成一定的浪费。当上坡坡度更大时, F_6 以及 F_7 的影响不应该被忽略。在实际工程应用中, 应首先确定满足盾构隧道防水要求的管片环间轴向压力值, 之后根据所需的压力值和工程实际情况, 设计合适的堆填土体长度与高度。

2 结 论

针对空推隧道处于水平、上坡、下坡3种工况下的盾构机反作用力构成进行分析,并给出相应的反作用力计算方法。研究表明,隧道在上坡状态下应考虑盾构机和堆填砂土重量分力产生的额外反作用力作用,而在下坡状态则应考虑盾构机和堆填砂土重量分力引发的反作用力减小。相关研究结果可以为类似工程提供理论参考。

参考文献

- [1] 何宁, 顾保南. 城市轨道交通对土地利用的作用分析[J]. 城市轨道交通研究, 1998(4): 32-36.
HE Ning, GU Bao-nan. An analysis of the influence of unurban mass transit upon land use[J]. Urban Mass Transit, 1998(4): 32-36.
- [2] LIAO S M, LIU J H, WANG R L, et al. Shield tunneling and environment protection in Shanghai soft ground[J]. Tunnelling Underground Space Technol, 2009, 24(4): 454-465.
- [3] 李剑明. 盾构空推过矿山法隧道新工艺[J]. 铁道标准设计, 2011(11): 93-96.
LI Jian-ming. Technology of pushing an empty shield through a mining excavated tunnel[J]. Railway Standard Design, 2011(11): 93-96.
- [4] 李锦富, 罗忠. 盾构空推拼管片过矿山法隧道渗漏水控制[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(2): 71-75.
LI Jin-fu, LUO Zhong. Water leakage control of segment lining in a mined tunnel section[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49 (2): 71-75.
- [5] 王春河. 盾构机空推过矿山法段地铁隧道施工技术[J]. 铁道标准设计, 2010(3): 88-91.
WANG Chun-he. Constrction technology for shield passing through empty mined tunnel[J]. Railway Standard Design, 2010(3): 88-91.

【简 讯】

2021年岩土工程西湖论坛（一号通知）

岩土工程西湖论坛（2021）拟定于2021年10月23—24日在杭州花家山庄召开。

计算与分析在岩土工程设计规划、运维管控、防灾减灾等全生命周期各个阶段皆发挥着不可或缺的作用,因此,本次会议主题设定为岩土工程计算与分析。会议旨在加强土木工程各行业间的交流,促进我国岩土工程计算与分析水平不断提高,开发拥有自主知识产权的岩土工程计算分析软件,更好地为我国工程建设服务。会前将围绕该主题组

织有关专家学者编写专著岩土工程西湖论坛系列丛书第五册《岩土工程计算与分析》,并在中国建筑工业出版社出版。

热忱欢迎各位同行积极参与。

联系人: 宋秀英

联系电话: 0571-88208775

电子邮件: xysong2020@163.com

浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心网址:

<http://www.zjdxyt.com>